

競合脱線と軌道狂い

北岡 寛太郎*・池守 昌幸**

1. まえがき

いわゆる貨車の競合脱線の原因を技術的に調査し、その防止対策を樹立することを目的として、昭和43年に部外学識経験者の参加も得て国鉄内に設置された「脱線事故技術調査委員会」は、昭和47年2月までに13回の委員会、25回の幹事会による審議を行ない、当初目的とした審議を一応終了したので、報告書を作製し、2月4日の第13回委員会をもって解散した。委員会の審議の過程において、脱線防止に有効と見られる対策のうち早急に実施できるものは逐次実施に移され、これらの対策の効果が現われるに従って、昭和44年度に13件あった競合脱線は45年度には9件、46年度には3件と著しく減少してきている。

競合脱線とは、それぞれ単独の条件では脱線を起こし得ない車両・線路・積荷・運転状態などの多因子が、特定条件で重なり合ったとき起こる脱線とされているが、具体的にこれらの諸因子の脱線に及ぼす影響および因子相互の因果関係を明らかにすること、関係因子の改善によって脱線を防止する方策を見いだすことが検討の眼目であった。委員会が設立されて以来行なわれた作業としては、① 狩勝実験線における脱線試験、② 営業線における現車試験による実態把握、③ 実際の競合脱線の際の関係因子の調査および走行試験、④ 実験線試験の結果を加味した新しい力学モデルによる理論的検討、⑤ 専用のハイブリット計算機によるシュミレーションなどがあり、これらの成果は膨大な「本報告」および「付属資料」に詳細に述べられている。この報告の内容は、車両・軌道・運転など多岐にわたるものであり、本文ではこのうちから、軌道狂いと貨車の走行安全性との関係を中心に成果の概要を紹介したい。

2. 過去の調査・研究の経緯

車両と軌道の相互関係は鉄道の基礎的問題の一つであり、これまでに軌道の変位（軌道狂いと呼ばれている）

と車両走行の相関性について多くの調査・研究がある。しかし、貨車の走行安全性との相関についての本格的な研究が進められるようになったのは比較的最近のことであり、以前の研究の主流は客車の動揺に関するものであった。一般に、車両の運動と軌道狂いの相関の問題は、力学的には、ばねとダンパーをもつ質量に作用する強制力に対する応答を求めるものであるが、貨車を含む車両の左右方向の強制振動については、車輪フランジとレールとの間に存在する横動遊間および車体支持装置における非線型性のために、微小振幅のものに対する理論理解以外は得られていない。

このような状況から、貨車の走行安全性と軌道狂いの相関を求めるのに実験的検討の方法が多く用いられ、数次にわたって現車試験が行なわれている。これらの試験の結果は、その時期によって解析の力点が違っていたり供試車種が異なっていたりしているために、必ずしも統一的でないが、通り狂い（左右方向の変位）の量が大きくなると車輪横圧が大きくなること、列車速度が高くなると軌道狂いと貨車の走行安全性との相関が生ずることなどがおもなものであった。しかし、この相関性は必ずしも高いものではなく、同一の軌道狂い量で走行安全性にかなりのちらばりが見られるものであり、委員会発足当時このちらばりのうちから貨車の走行安全性にかかわる軌道狂いの条件を見いだすことが求められていた。

3. 脱線の発生機構

車輪がレールを乗り越えて脱線するには、車輪のフランジがレールの側面を転がり上がることと、すべり上がることの2つの場合が考えられており、車輪フランジとレールの接点における力の釣合いから、車輪横圧 Q と車重 P との比 Q/P （脱線係数）が普通 1.0~1.1 を越えると転がり上がりが生ずるとされている（すべり上がりを生ずる Q/P はもっと大きい）。このことから、安全を見込んで、その限界値を 0.8 にとり、 Q/P を車両の走行安全性を示す尺度として用いられている。

Q/P が大きくなるには、分子の Q が大きくなるのと分母の P が小さくなるのと2通りの道がある。普通、横圧が大きくなるためには、ある程度輪重が大きいこと

* 正会員 日本国有鉄道北海道総局長、前本社施設局長

** 正会員 日本国有鉄道鉄道技術研究所 軌道研究室長

が必要であり、したがって、大きな Q/P を生ずるのはなんらかの原因で車輪がレールに激突して大きな Q が生ずるためという考え方が支配的であった。このなんらかの原因としては、たとえば大きな通り狂いとか車輪の蛇行動、あるいは急激にブレーキが作用したときに生ずる車両の横変位などが考えられていた。

今回の一連の検討で明らかになったのは、脱線が起こるには輪重の減少が著しい、すなわち前段で述べた Q/P を大きくする2つの道のうち、いままであまり考えられていなかった後者のほうを問題にする必要があるということである。図-1 は狩勝実験線で得られた車輪横圧と輪重の記録波形（横圧は基準線から上の高さ、輪重は波形の包絡線の幅がそれぞれ横圧値・輪重値を表わす）であるが、輪重が極小となる場所では横圧はほとんど0で、輪重が漸増する過程において横圧が発生して急激に大きくなっている。したがって、輪重がまだ小さいうちに横圧が生ずると、横圧がとくに大きくなっても Q/P の値は十分に大きくなる。実際に実験線の試験で脱線を生じたのは大部分が、図-1 に見られる横圧が0から急激に立上がっている位置付近で、そのときの輪重がごく小さいという場合であった。この位置では、車輪はレールに突っかけるような角度をもってあたって乗り上がりうる状態であり、このとき Q/P が大きければ脱線が生ずることは十分に納得できることであった。

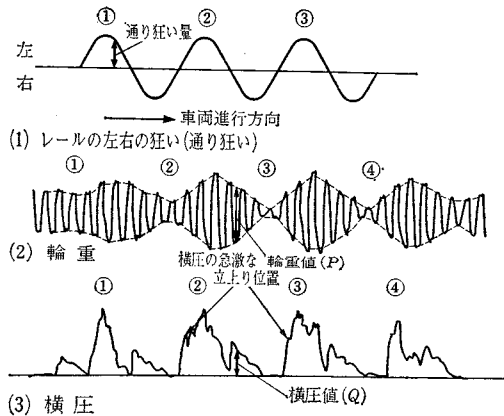


図-1 車両横圧、輪重の測定記録

実験線において起った2軸貨車の脱線は、すべて上記の形態であり、また営業線の脱線事故調査の現車試験の結果から見ても、大部分の場合に脱線時には著しい輪重減少が伴っていると考えられる。

4. 輪重減少と軌道狂い

前述のことから車両の運動として重視されるのは車体のローリング（左右傾向運動）と横変位で、車体が一方に傾くとき他方の輪重は小さくなり、これに車体の横変

位が加わるとさらに輪重が減少する場合が出現する。車体のローリング、横変位の発生は次の2つに基因すると考えられる。

その一つは、車軸の蛇行動によるもので、車体はばねやリンクなどの支持装置を介して車軸と連成しており、車軸の蛇行動は車体にローリングや横変位を誘発する。車軸の蛇行動とは図-2 に示すように、走行中に車軸が進行方向に対して傾きおよび横変位を生じながら進む運動をいうが、これは車輪の踏面に $1/20 \sim 1/40$ の勾配をもつために起こる鉄道車両独特のものであり、車輪とレールとの接触点に作用するクリープ力や車軸の慣性力などと関連して本質的に不安定な運動であることが知られている。まっすぐな軌道においても車軸中心と軌道中心が合致しないかぎり、車輪踏面の勾配のために左右車輪のレールとの接触点における車輪直径には相違があり、このため左右車輪の前進距離には差を生ずる（図-3）。これが車軸の傾きを招いて蛇行動を生ずることになるのであるが、軌道に存在している曲がり（通り狂い）はレールに接触している位置の車輪直径を変える役割を演ずる（図-3 で車輪が静止してレールが左右に動くと考えるとよい）から、蛇行動の一つの原因となる。したがって、通り狂い→車軸蛇行動→車体ローリングおよび横変位→輪重減少という因果関係が生ずる。

もう一つのローリングの発生源として、軌道に存在する左右レールの高さの差（水準狂い）がある。水準狂いの存在は車輪を介して車体に傾きを与えるから、これがローリングの原因となることは容易にわかる。

貨車の輪重減少ひいては脱線と通り狂い、水準狂いとは上記のように結びつけられるが、これらの軌道狂いの存在が、すべての場合に貨車の走行安全を害するのではなく、貨車の走行特性と関連して特定の場合に著しい走

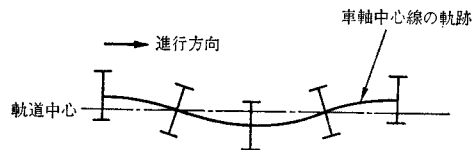


図-2 車軸の蛇行動

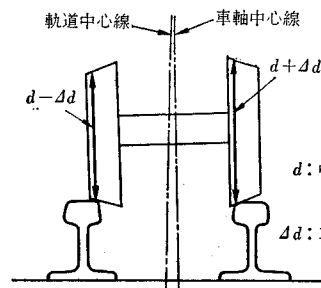


図-3 レールと車輪の関係

行安全性の低下が生ずるものであり、これが競合と呼ばれるゆえんである。

5. 貨車の周波数応答特性

前にも述べたように、鉄道車両はばねとダンパーをもつ振動系であり、その周波数応答特性を考えることができる。狩勝実験線では、波長 10~25 m の正弦波形の軌道狂いを 3 波長分の長さで設定して供試車を 40~75 km/h の速度で走行させ、実用の速度域において生ずるいろいろな周波数の強制振動を受けたときの供試車の諸挙動を観測した。

図-4 は横圧、輪重減少比（輪重減少量/静止時輪重）および脱線係数の 3 つの走行特性値の変化を、軌道狂い波長と走行速度から定まる加振周波数を横軸にとり示したもので、図中の ②、③ は図-1 における極値の生じた位置である。図-4 は 2 軸貨車の一形式であるワラ 1 型貨車のものであるが、見られるように非常に明瞭な周波数応答特性をもっており、0.8~1.0 Hz 付近におい

て輪重減少比・脱線係数が急激に大きくなる、すなわち走行安全性が低下することが示されている。

上記のような特性は他形式の 2 軸貨車でも同様であることが実験線試験で確かめられたが、2 軸貨車がこのような明らかな特性をもつことは初めて得られたもので、問題の解明に重要な手がかりを与えることとなった。

6. 走行安全性と軌道狂い形状

貨車が前節で示したような周波数特性をもつということから、軌道狂いの定常的な連続形状が走行安全性の上から不都合であることが導かれるが、図-4 における ②と ③ の走行特性値の比較から、特定の周波数領域（0.8~1.0 Hz）では、軌道狂いの 1 波長通過後（②）走行安全性はかなり低下し、それより先（③）ではさらに低下することが得られる。ただし、このようなことは前述の特定周波数領域にかぎられ、その他の周波数領域では軌道狂いの連続の影響はない。また、① では軌道狂いの大きさがかなり大きな場合でも、走行安全上問題となるような走行特性値は、実験線では観測されなかった。

走行安全性の低下の生ずる 0.8~1.0 Hz という周波数領域は、常用の貨物列車速度 50~75 km/h に対して、ほぼ 14~26 m の軌道狂い波長が対応することとなる。このような波長は普通に存在するものであり、したがって貨車の走行安全性が低下する機会は少ないものではない。ただし、営業線における軌道狂い波形は、ほとんどの場合いくつかの波長からなる合成波であり、このことが実際の脱線をまねなものにしていると考えられる。

従来の経験から、通り狂いと水準狂いが同一波長で存在し、軌道中心より外側へ偏倚している側のレールが対側レールより低い場合（通りと水準の逆位相複合形と呼ばれている。図-5 参照）が走行安全上不都合であると考えられ、実験線ではこの形で軌道狂いが設定された。図-6 は実験線試験から得られた周波数 0.85 Hz 付近における逆位相複合形の場合の通り狂い量、水準狂い量と走行特性値との関係を示す図であるが、このような悪条件のもとでは、通常存在している通り狂い 10 mm、水準狂い 7 mm 程度で、脱線係数は 3.0 で述べた限界値 0.8 となる。

以上のことは、実験線試験のほかに、シミュレーションや、理論的解析でも確かめられ競合脱線における軌道狂いの基礎的条件が明

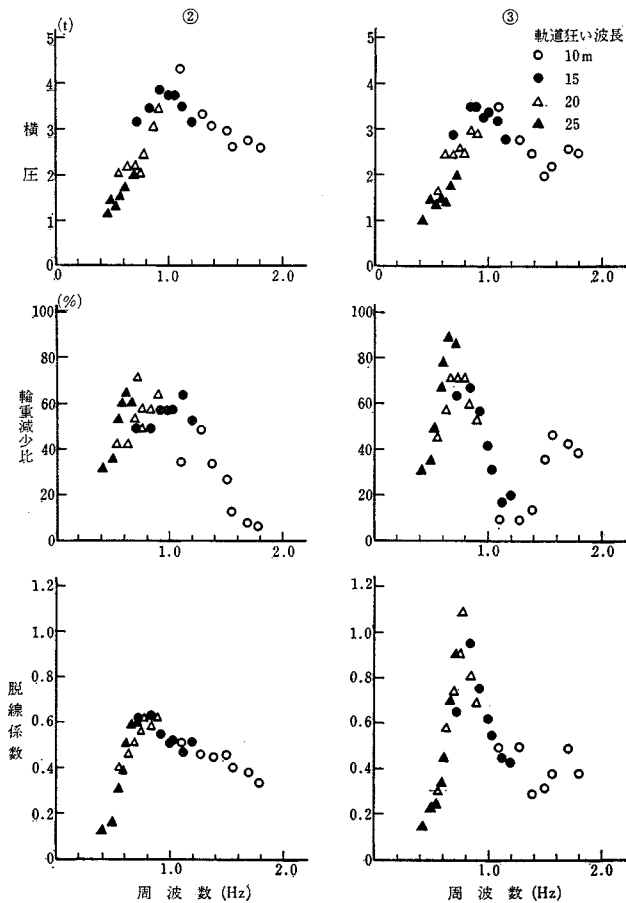
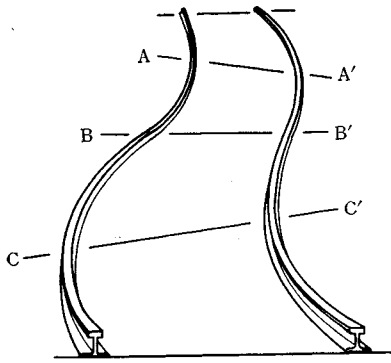
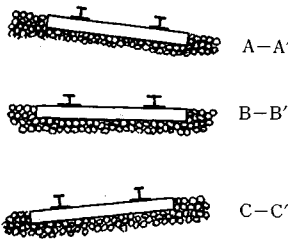


図-4 周波数と走行特性値



(1) 通り狂い



(2) 水準狂い

図-5 通りと水準の逆位相複合形

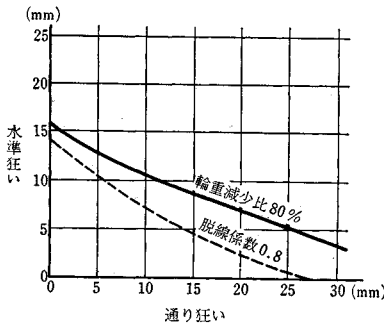


図-6 通り、水準狂いと走行特性値

らかにされたといえる。前節で示したような、常用の速度で出現する周波数領域において、1波長ないし2波長の軌道狂いを通過後に著しい走行安全性が低下する貨車の走行特性に対しては、適当なダンピング効果を与えることなどによって対策が講ぜられることになるが、軌道における処置としては、競合脱線を生ずる可能性のある軌道狂い形状の管理を精力的に行なう必要がある。

7. 曲線スラックの縮少

車軸の蛇行動が車体ローリングなどを誘発することを前に述べたが、蛇行動の振幅が大きいかほどローリングなどの振幅も大きくなり、輪重減少が著しくなる。車軸の蛇行動に対してレールの存在はストッパーの役割を果た

しており、蛇行動の振幅は車輪フランジとレール間の横動遊間に限定される。したがって、輪重減少を少なくするため車輪フランジとレール間の横動遊間を縮少する方策が考えられ、具体的に曲線におけるスラックの縮少、直線における標準軌間の縮少の効果が検討された。いずれの場合も貨車の走行安全性の向上に効果があること、曲線スラックの縮少において蒸気ならびに電気機関車の通過の場合の横圧が大きくなることはないことが確かめられた。元来、曲線スラック寸法は車軸が円滑に曲線を通過できることを考えて定めたものであるが、スラックの縮少は一般的に曲線転向の円滑性が減少することとなるから、車輪およびレールの摩耗、保守労力に及ぼす影響などを調査のうえ実施を検討することとなった。

8. 今後の課題

以上述べたように、競合脱線における軌道狂いの関与の基礎的条件は明らかになったが、今後の問題として、競合脱線を生ずる可能性のある軌道狂いの管理法、具体的には発見方法・規制基準・検査周期・保守方法などを確立する必要がある、このために営業線における実態調査、各種軌道狂いと走行特性値との相関分析などを続ける必要がある。競合脱線において問題となるのは、単に軌道狂いの大きさだけではなく、波長・連続性のような軌道狂い形状や通り狂いと水準狂いの逆位相複合といった従来の軌道狂い管理の対象外の事柄が多く、これら管理に関して新しい工夫が必要である。このような残された課題についてはさらに研究を続ける予定であり、近い将来において競合脱線の絶滅を期したい。

もっぱら軌道狂いに関する事項のみを述べたが、委員会の審議を経て実施された脱線防止対策としては、① 2段リンク式貨車のN踏面化、② 2軸ボギータンク車の台車改造および側受すき間変更、③ 2軸ボギーホッパー車の台車改造、④ 2軸ボギー石炭車の台車ばね改造、⑤ 速度制限および一部線区への入線禁止、⑥ 2段リンク式貨車のリンク中間ばね吊り座の改造、⑦ 偏積測定装置の設置による偏積防止、⑧ 脱線防止レールあるいはガードの敷設などがあり、連続軌道狂いおよび通り狂いと水準狂いの逆位相複合については指導による規制が実施されていることを付記して本稿を終える。

参考文献

- 1) 大月隆士・堂前文男：競合脱線とその防止対策，土木学会誌，55-6，pp. 44~49，1970.6.
- 2) 池守昌幸：狩勝実験線試験における軌道狂いと二軸貨車の走行安全性との相関，鉄道技術研究報告，No. 776，1971.10.
- 3) 脱線事故技術調査委員会：脱線事故技術調査委員会報告，1972.2.
(1972.3.27・受付)
(1972.5.22・再受付)